

DMC/柴油混合燃料共轨柴油机燃烧循环变动研究^{*}

梅德清¹ 任 华¹ 姜士阳¹ Baar Roland²

(1. 江苏大学汽车与交通工程学院, 镇江 212013; 2. 柏林工业大学机械与交通工程系, 柏林 10587)

摘要: 研究了不同条件下 DMC/柴油混合燃料共轨发动机的燃烧循环变动, 以及 COHR 和 EGR 率对燃烧循环变动的影响。结果表明: 共轨发动机燃用不同燃料时的燃烧循环变动率都较小; D10 燃料燃烧的循环变动率大于纯柴油; 发动机大负荷时的循环变动率相对较小; 随着 COHR 的增加, 以 p_{mi} 为表征参数的循环变动系数变化不明显; 以 p_{max} 为表征参数的循环变动系数略有增大, 而以 θ_d 为表征参数的循环变动系数明显增长; D10 燃料的循环变动系数随 EGR 率的增加呈缓慢增长, 柴油则相对平稳; 高的平均指示压力对应着短的火焰发展期。

关键词: 碳酸二甲酯 高压共轨柴油机 燃烧 循环变动

中图分类号: TK421 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)08-0014-05

引言

碳酸二甲酯(Dimethyl carbonate, DMC)具有含氧量高(53.3%)、沸点低、与柴油互溶性好和无毒的特点。当 DMC 以一定的比例与柴油互混应用于柴油机时, 能在一定程度上提高有效热效率, 改善燃油经济性, 且 HC、CO 及碳烟排放均有不同程度的降低^[1-3]。因此, DMC 作为柴油添加剂具有巨大的市场潜力^[4-5]。

高压共轨控制系统可以实现喷油量、喷射压力以及多段喷射规律的精确控制^[6]。目前, 国内外有关在柴油中添加低十六烷值(Cetane number, CN)燃料运用于高压共轨柴油机的燃烧循环变动研究较少见。由于预喷油量较少, DMC/柴油的 CN 相对较低, 可能会使燃烧变得不稳定, 为控制排放引入 EGR, 又可能会导致循环变动更为剧烈^[7-8]。

本文在一台高压共轨单缸柴油机上进行不同燃料组分(纯柴油和 DMC/柴油)的燃烧特性研究, 并分析不同 EGR 率和放热中心(Center of heat release, COHR)条件下的燃烧循环变动情况。COHR 指放热率为 50% 时对应的曲轴转角, 即缸内燃烧的中点位置。COHR 和上止点的对应关系, 可间接反映燃烧放热率曲线的相位(燃烧放热过程发生的“早”与“晚”)^[9-10]。燃烧过程中兼有预混和扩散燃烧的特性, 以及引入 EGR 使缸内燃烧温度降低, 因此研究这一复杂燃烧过程的循环变动, 对认识其变动规律和相关影响因素具有一定的意义^[11-12]。

1 试验材料与方法

1.1 试验燃料与设备

试验样机是一台高压共轨单缸柴油机, 主要参数见表 1, 其原型是 4 缸柴油机 Daimler Benz OM646 经机械改造而成, 改造基准是保持动力性能指标单缸平均指示压力 p_{mi} 恒定。相关试验在柏林工业大学发动机研究所完成。

表 1 发动机基本参数
Tab. 1 Basic parameters of the engine

项目	参数
发动机类型	单缸、4 冲程、直喷式
缸径/mm	88
行程/mm	88.34
排量/L	0.537
压缩比	15.88
标定转速/(r·min ⁻¹)	4 000
平均指示压力/MPa	2.05
喷射管理系统	IAV
喷油器	Bosch CRI-2.2

在柴油中添加体积分数 10% DMC 的混合燃料称为 D10, 并与纯柴油做对比试验。试验设备具体参数如表 2 所示。试验过程: 选择 1 900 r/min 转速下的两个负荷作为性能试验, 同时采集气缸压力信号(每工况连续采集 100 个循环数据), 将平均指示压力 p_{mi} 和放热中心 COHR 两者都作为发动机工况监控目标参数。气缸压力采样分辨率为 0.1°CA。

收稿日期: 2013-09-02 修回日期: 2013-10-15
^{*} 国家自然科学基金资助项目(51076069)和江苏高校优势学科建设工程资助项目(苏政办发[2011]6号)
作者简介: 梅德清, 副教授, 博士, 主要从事发动机替代能源及排放控制研究, E-mail: meideqing@ujs.edu.cn

根据热力学第一定律,利用 IndiCom 软件可得到实时放热规律。通过插值方法寻找到放热率为 50% (COHR) 对应的曲轴转角。对于特定的发动机工作模式,通过调整喷油参数使得 COHR 在目标值 $\pm 0.5^{\circ}\text{CA}$ 范围内。更换燃料后,发动机需经过恰当的暖机,消耗掉供油系统管路中残存的前一种燃油。为弥补 D10 燃料能量密度的下降,D10 的油轨压力要比柴油高 3 MPa。对于 D10 燃料,试验测试了两种方案:系统的喷油系统参数不变;对喷油系统参数略作微调(喷油稍向后推迟),以精确实现 COHR 与原柴油机一致。

表 2 主要测试设备
Tab.2 Main instruments for test

名称	生产单位	型号规格
测功机	SiemensAG	1GG6 164
燃油质量流量计	AVL List GmbH	735
空气质量流量计	ABB	Sensyflow
缸内压力传感器	Kistler	6043ASP
燃烧分析仪	AVL List GmbH	IndiCom

图 1 展示了某一工况下 3 种燃油喷射状态的电磁阀开启正时和喷油脉宽 ($p_{mi} = 0.80\text{ MPa}$, COHR 为 16°CA , EGR 率为 36%),从中可看出 D10 在喷油参数未调整时和柴油保持相位同步,而为了实现精确的 COHR 目标,优化后的 D10 喷射被延迟了一段时间。发动机在这 3 种燃油喷射状态下的详细喷油参数及燃烧过程与排放特性分析参阅文献 [13]。

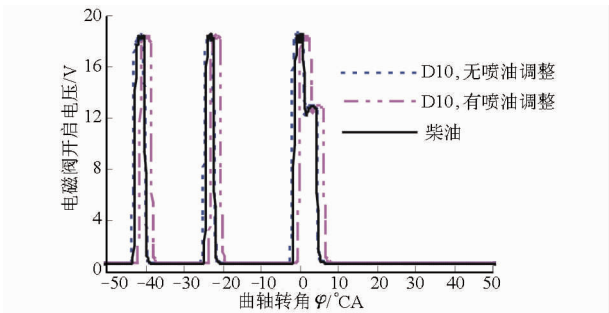


图 1 燃油喷射脉宽图
Fig.1 Pulse width of fuel injection

1.2 循环变动评价准则

循环变动系数 (Coefficient of variation, COV) 可表征多个循环的一致性,广泛用于评价发动机的循环变动状况 [13]。其定义为

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \tag{1}$$

$$\sigma_x = \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 / N} \tag{2}$$

$$C_{COV} = \frac{\sigma_x}{\bar{x}} \times 100\% \tag{3}$$

式中: x 表示某一参数; $\bar{x}$ 表示 x 的平均值; σ_x 表示 x

的标准偏差; C_{COV} 表示 x 的循环变动系数。依此求出平均指示压力 p_{mi} 、缸内峰值压力 p_{max} 及其对应曲轴转角 θ_{pmax} 、火焰发展期 θ_d 对应的循环变动率 [14-15]。火焰发展期 θ_d 定义为从喷油开始至总放热量的 10% 所经历的曲轴转角 [16]。

2 循环变动分析

2.1 平均指示压力 p_{mi}

平均指示压力是评价循环变动的一个重要指标,表征整个循环压力变动的综合情况。图 2 列举了转速 1 900 r/min 两个负荷工况下平均指示压力循环变动系数随 COHR 以及 EGR 率的变化特性。由于采用了精确控制的高压共轨燃油喷射系统,从图 2 可以看出,柴油的循环变动系数均在 1.5% 以内,这与一般的自然吸气式柴油机大于 2.0% 不同 [17-18]。如图 2 所示,柴油的循环变动系数普遍要小于 D10 的循环变动系数,这是因为 DMC 的十六烷值较低,D10 燃料相对较差的着火性能使循环变动率增高。另外, $p_{mi} = 0.80\text{ MPa}$ 工况的循环变动系数整体要小于 $p_{mi} = 0.44\text{ MPa}$ 工况,前者的循环变动系数介于 0.71% ~ 1.12% 之间,而后者则介于 1.33% ~ 1.73% 之间。这是因为发动机负荷较大时,缸内温度相对较高,有利于火核早期的形成和发展,因而燃烧循环变动率较小。此外,负荷较小则评价基数 p_{mi} 也较小,作为相对值的循环变动系数也就略大。

如图 2a 和图 2c 所示,D10 燃料对应的循环变动系数的波动范围分别为 0.19% 和 0.32%,而柴油的循环变动系数的波动则相对稳定(波动范围均在 0.11% 以内),说明随 COHR 的变动,柴油的循环变动率波动较小。D10 燃料的循环变动系数随 COHR 增加波动较大的原因在于:其十六烷值相对较低但雾化性能较好,随着 COHR 的增长(即燃烧的推迟),火核形成阶段缸内燃油液滴雾化情况和气体湍流强度均不一致,从而导致 D10 燃料循环变动系数的波动较大。

循环变动系数随 EGR 变动的规律如图 2b、2d 所示,可见 D10 燃料的循环变动系数随 EGR 率的增加普遍呈增大的趋势,这是因为随着 EGR 率的增加,单位体积内燃料和氧气含量下降,混合气的组分进一步变差,火焰传播速率下降,燃烧的不稳定性增大。另外,柴油的循环变动系数随 EGR 的增加变动幅度也很小。

2.2 缸内峰值压力 p_{max}

缸内峰值压力对应曲轴转角的分布如图 3 所示,可见主要的曲轴转角集中了大部分的 p_{max} ,且对

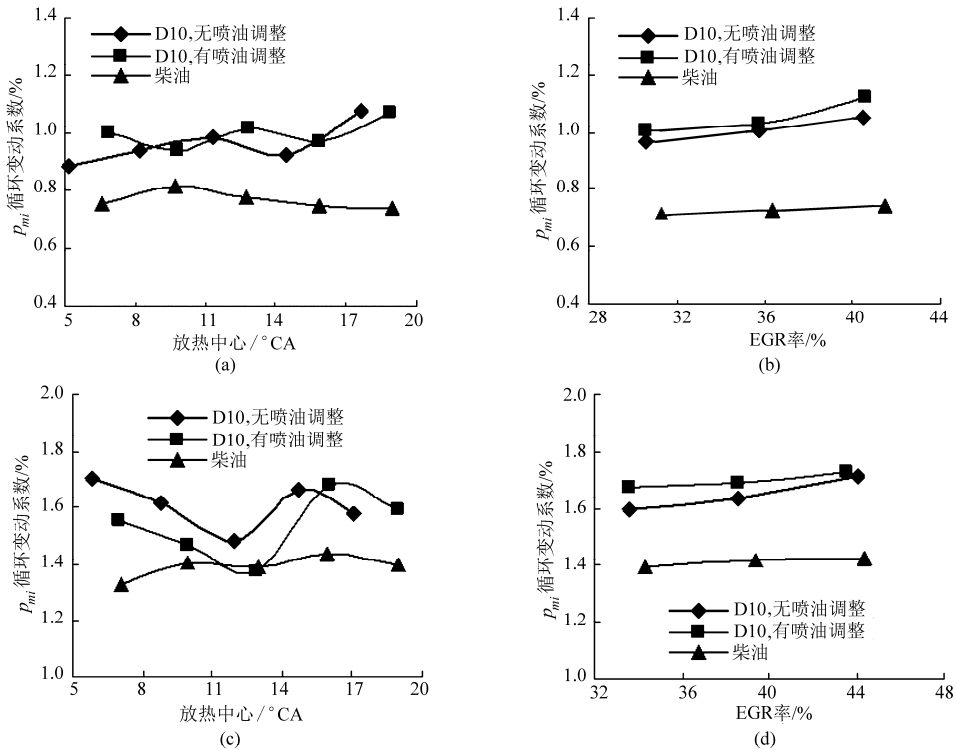


图 2 COHR 和 EGR 率对 p_{mi} 循环变动系数的影响

Fig. 2 Effects of COHR and EGR on cyclic variations coefficient of p_{mi}

(a) $p_{mi} = 0.80$ MPa, EGR 率为 36% (b) $p_{mi} = 0.80$ MPa, COHR 为 16 $^{\circ}$ CA
(c) $p_{mi} = 0.44$ MPa, EGR 率为 44% (d) $p_{mi} = 0.44$ MPa, COHR 为 16 $^{\circ}$ CA

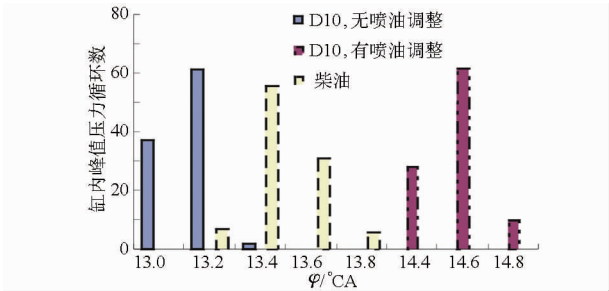


图 3 缸内峰值压力对应曲轴转角分布

($p_{mi} = 0.80$ MPa, COHR 为 16 $^{\circ}$ CA, EGR 率为 36%)

Fig. 3 Distribution of peak pressure respect to crankshaft angle

应曲轴转角分布十分集中,其范围不超过 0.6 $^{\circ}$ CA,这与采用高压共轨系统精确控制燃油喷射密不可分。而 D10 燃料缸内峰值压力对应的曲轴转角则更为集中(范围不超过 0.4 $^{\circ}$ CA),并且某一曲轴转角集中了更多的压力峰值。另外,此工况下 p_{max} 与 COHR 出现的位置较为接近,两者的间隔角约为 2 $^{\circ}$ CA。

缸内峰值压力循环变动系数随 COHR 和 EGR 率的变化如图 4 所示。与以 p_{mi} 为表征参数相比, p_{max} 循环变动系数更小,两者的差别除了表征参数的特性不同外,也与式(3)中 p_{max} 值的基数较大有关系。

图 4a 中 D10 无喷油调整和有喷油调整的平均

循环变动系数分别为 0.53% 和 0.54%,略高于柴油的 0.49%。其中柴油的循环变动系数相对平稳,而 D10 的循环变动系数随 COHR 的增加总体上呈增大的趋势。缸内压力数据显示,随着 COHR 的增加,

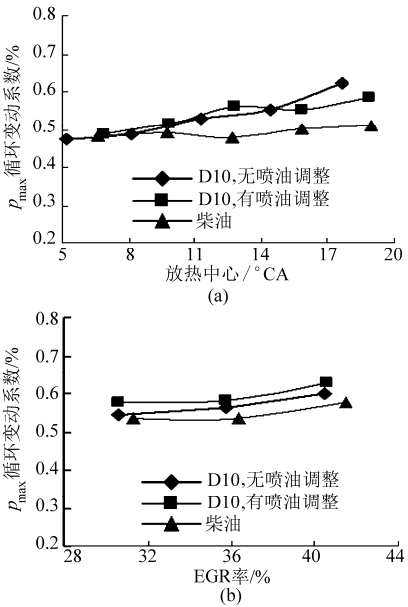


图 4 COHR 和 EGR 率对 p_{max} 循环变动系数的影响

Fig. 4 Effects of COHR and EGR on cyclic variations coefficient of p_{max}

(a) $p_{mi} = 0.80$ MPa, EGR 率为 36%
(b) $p_{mi} = 0.80$ MPa, COHR 为 16 $^{\circ}$ CA

p_{max} 值变小。这是由于随着喷油的延迟 (COHR 增加), 缸内温度和压力较高, 燃油喷入后在短时间内开始着火 (即滞燃期缩短), 从而导致压力升高率降低, 气缸内的最大爆发压力变小。图 4b 中 p_{max} 循环变动系数随 EGR 率增加也呈增大的趋势, 波动范围差别较小。

2.3 火焰发展期 θ_d

火焰发展期 θ_d 的循环变动系数随 COHR 变化的规律如图 5 所示, $p_{mi} = 0.80\text{ MPa}$, EGR 率为 36%。与 p_{max} 表征参数相同的是, θ_d 循环变动系数随 COHR 的增加呈增长态势, 且趋势较为明显。随

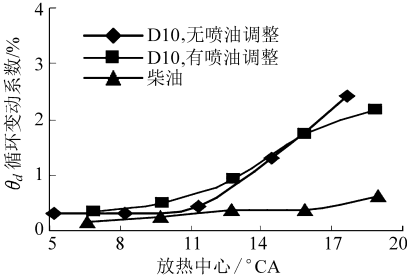


图 5 COHR 对火焰发展期循环变动系数的影响
Fig. 5 Effect of COHR on cyclic variations coefficient in flame developing period

着喷油的推迟 (即 COHR 增加), 喷油时刻缸内的温度和压力升高, 着火延迟期缩短, 相应地火焰发展期亦缩短。因此, 作为基数的火焰发展期将导致循环变动系数的增大。与柴油相比, D10 燃料的循环变动系数更大, 是因为 DMC 的存在会使得混合燃料在初期阶段放热更迅速^[13], 因而达到 10% 放热率的火焰发展期亦缩短, 使得图示中以火焰发展期表征的 D10 的循环变动率高于柴油。

2.4 特征参数之间的关系

图 6 给出了平均指示压力 p_{mi} 与缸内峰值压力 p_{max} 特征参数之间的关系, D10 无喷油参数调整、D10 有喷油参数调整和柴油这 3 种状态的特征参数之间存在着很好的对应关系。其中 D10 有喷油参数调整和柴油这两种状态的 p_{mi} 分布更为集中; 相反, D10 无喷油调整的 p_{max} 分布则更集中。

图 7 给出了火焰发展期 θ_d 与平均指示压力 p_{mi} 之间的关系, 在 3 种喷油状态下两者之间也呈现较好的关系。火焰发展期与平均指示压力特征参数间呈反对应关系, 这说明较高的平均指示压力对应着较短的火焰发展期, 其中柴油的 θ_d 分布更为集中, D10 的 θ_d 与 p_{mi} 分布相对较松散。

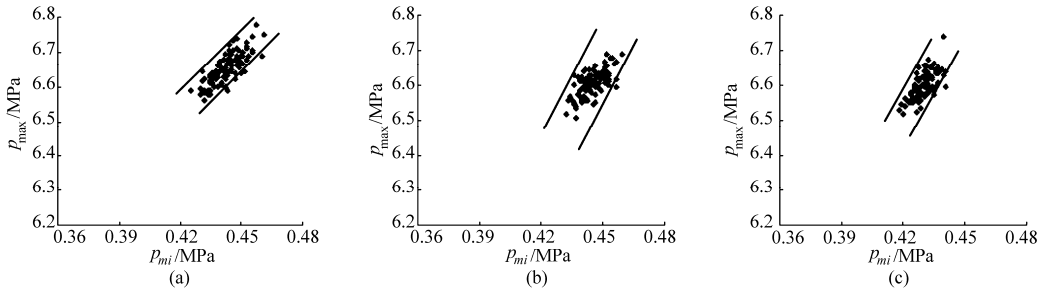


图 6 p_{mi} 与 p_{max} 之间的相关性 ($p_{mi} = 0.44\text{ MPa}$, COHR 为 7°CA , EGR 率为 44%)
Fig. 6 Correlation between p_{mi} and p_{max}
(a) D10, 无喷油调整 (b) D10, 有喷油调整 (c) 柴油

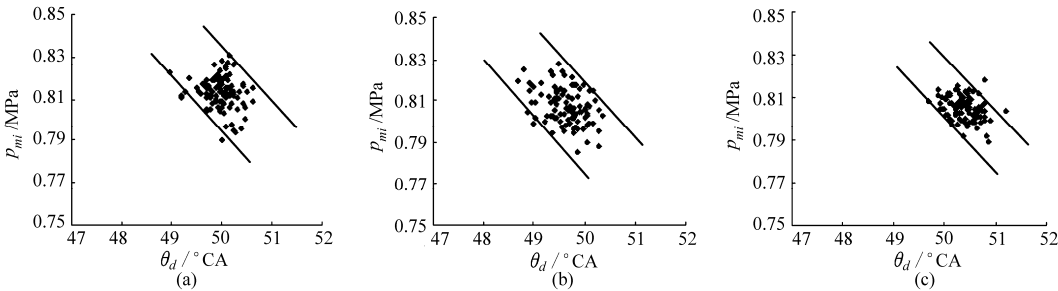


图 7 p_{mi} 与火焰发展期之间的相关性 ($p_{mi} = 0.80\text{ MPa}$, COHR 为 16°CA , EGR 率为 41%)
Fig. 7 Correlation between p_{mi} and the flame developing period
(a) D10, 无喷油调整 (b) D10, 有喷油调整 (c) 柴油

3 结论

(1) 以平均指示压力、缸内峰值压力和火焰发

展期为表征参数, 均可见柴油的循环变动系数较 D10 小, 此外还发现小负荷时循环变动系数增加。采用精确控制燃油喷射的共轨系统, 其循环变动率

小于既往统计数据。

(2) COHR 和以 p_{mi} 为表征参数时的循环变动系数之间没有明显的相关性,但混合燃料 D10 的循环变动系数波动比柴油的大;以 p_{max} 为表征参数的循环变动系数随 COHR 的增加缓慢增大;以 θ_d 为表征参数的循环变动系数随 COHR 的增加明显增长。

随着 EGR 率的增加,D10 燃料的循环变动系数在 3 种表征参数下均呈可见增长,而柴油则相对平稳。

(3) 平均指示压力与缸内峰值压力及火焰发展期之间均有着很好的对应关系,较高的平均指示压力对应着较短的火焰发展期,柴油的火焰发展期分布更为集中。

参 考 文 献

- 1 Nabi M N, Minami M, Ogawa H, et al. Ultra low emission and high performance diesel combustion with highly oxygenated fuel [C]. SAE Paper 2000-01-0231, 2000.
- 2 Wang J, Wu F, Xiao J, et al. Oxygenated blend design and its effects on reducing diesel particulate emissions[J]. Fuel, 2009, 88(10): 2037-2045.
- 3 Kitagawa H, Murayama T, Tosaka S, et al. The effect of oxygenated fuel additive on the reduction of diesel exhaust particulates [C]. SAE Paper 2001-01-2020, 2001.
- 4 訾昆,涂先库,黄永青,等. 柴油和碳酸二甲酯混合燃料对柴油机性能的影响[J]. 内燃机工程, 2007, 28(3): 63-66.
Zi Kun, Tu Xianku, Huang Yongqing, et al. Effects of diesel oil-DMC blend fuel on performances of diesel engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2007, 28(3): 63-66. (in Chinese)
- 5 Rounce P, Tsolakis A, Leung P, et al. A comparison of diesel and biodiesel emissions using dimethyl carbonates as an oxygenated additive[J]. Energy & Fuels, 2010, 24(9): 4812-4819.
- 6 董伟,于秀敏,张斌. 预喷射对高压共轨柴油机启动特性的影响[J]. 内燃机学报, 2008, 26(4): 313-318.
Dong Wei, Yu Xiumin, Zhang Bin. Effects of pilot injection on start characteristics of a common-rail diesel engine [J]. Transactions of CSICE, 2008, 26(4): 313-318. (in Chinese)
- 7 Lv X, Ji L, Ma J, et al. Combustion stabilities and cycle-by-cycle variations of *n*-Hptane homogeneous charge compression ignition combustion[J]. Energy & Fuels, 2007, 21(3): 1468-1473.
- 8 Rakopoulos D C, Rakopoulos C D, Giakoumis E G, et al. Experimental-stochastic investigation of the combustion cyclic variability in HSDI diesel engine using ethanol-diesel fuel blends[J]. Fuel, 2008, 87(8-9): 1478-1491.
- 9 Leermakers C A J, Berge B V D, Luijten C C M, et al. Gasoline-diesel dual fuel: effect of injection timing and fuel balance[C]. SAE Paper 2011-01-2437, 2011.
- 10 杨福源,杨雨平,欧阳明高,等. 柴油机基于缸压的闭环反馈控制技术[J]. 内燃机学报, 2012, 30(2): 172-178.
Yang Fuyuan, Yang Yuping, Ouyang Minggao, et al. Research on close-loop control strategy of diesel engine based on in-cylinder pressure[J]. Transactions of CSICE, 2012, 30(2): 172-178. (in Chinese)
- 11 张韦,舒歌群,彭益源,等. 柴油机富氧进气燃用乳化柴油的循环变动与燃烧特性[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9): 1-7.
Zhang Wei, Shu Gequn, Peng Yiyuan, et al. Cycle-by-cycle variations of a DI engine fueled with water emulsion diesel and oxygen enriched intake air[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 1-7. (in Chinese)
- 12 郑金保,缪雪龙,王先勇,等. 柴油机预混合燃烧循环变动特性研究[J]. 内燃机工程, 2011, 32(1): 85-92.
Zheng Jinbao, Miao Xuelong, Wang Xianyong, et al. Study on cycle-by-cycle variations of premixed combustion diesel engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2011, 32(1): 85-92. (in Chinese)
- 13 梅德清,任华,王忠,等. 基于喷油策略和 EGR 耦合控制的单缸共轨柴油机燃用 DMC/柴油调和燃料的研究[J]. 内燃机工程, 2013, 34(5): 7-12.
Mei Deqing, Ren Hua, Wang Zhong, et al. Study on the single-cylinder common-rail diesel engine fueled with DMC/diesel blend based on coupling strategies of fuel injection and EGR [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2013, 34(5): 7-12. (in Chinese)
- 14 Rakesh K M, Avinash K A. Experimental investigation on the effect of intake air temperature and air-fuel ratio on cycle-to-cycle variations of HCCI combustion and performance parameters[J]. Applied Energy, 2011, 88(4): 1153-1163.
- 15 汤东,沈飞,刘胜吉,等. 生物柴油掺烧率对非道路用柴油机燃烧循环变动特性的影响[J]. 内燃机工程, 2009, 30(5): 12-16, 21.
Tang Dong, Shen Fei, Liu Shengji, et al. Effect of bio-diesel fraction on cycle-by-cycle variations of an off-road diesel engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2009, 30(5): 12-16, 21. (in Chinese)
- 16 Efthimios Z. Correlations between cycle-to-cycle variations and combustion parameters of a spark ignition engine[J]. Applied Thermal Engineering, 2004, 24(14-15): 2073-2081.
- 17 Rakesh K M, Avinash K A. Statistical analysis of the cyclic variations of heat release parameters in HCCI combustion of methanol and gasoline[J]. Applied Energy, 2012, 89(1): 228-236.
- 18 Granet V, Vermorel O, Lacour C, et al. Large-eddy simulation and experimental study of cycle-to-cycle variations of stable and unstable operating points in a spark ignition engine[J]. Combustion and Flame, 2012, 159(4): 1562-1575.

Simulation and Experiment of Supplying Seeds in Box of Magnetic Precision Cylinder-seeder

Hu Jianping Guo Kun Zhou Chunjian Hou Chong

(Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Discrete element method was used to analyze the influence of working parameters on supplying seeds performance of magnetic precision cylinder seeder. Tomato powder coated seed was taken as the object of study, and then the seed and seeder simulation model was established. The mechanical interaction forces, both between seed and seeder and among the seeds were modeled by Hertz – Mindlin method(no slip). The effects of vibration frequency and amplitude on the seeds movement rule and the supplying performance were analyzed. The simulation results showed that when the vibration frequency was 40 Hz and the vibration amplitude was 0.5 mm or 0.75 mm, the seeds accumulated a stable height and the ideal seeds supplying performance could be received, which was beneficial to improve suction precision. In order to verify the reliability of the simulation model, high-speed photography technology was used to record the supplying process with the seed box vibration frequency of 40 Hz and vibration amplitude of 0.75 mm, and the supplying results were consistent with the simulation results. Experiments were carried out on magnetic precision cylinder-seeder and the results showed that the single grain rate was greater than 92% and leak seeding rate was less than 3% with the seed box vibration frequency of 40 Hz, vibration amplitude of 0.5 mm and 0.75 mm. The single grain rate was lower than 80% with vibration frequency of 20 Hz and 60 Hz, with different amplitudes.

Key words: Magnetic seeder Supplying seed Discrete element method Simulation

(上接第 18 页)

Combustion Cyclic Variations of Common-rail Diesel Engine Fueled with DMC/Diesel Blend

Mei Deqing¹ Ren Hua¹ Jiang Shiyang¹ Baar Roland²

(1. School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. Department of Mechanical Engineering and Transport Systems, Technical University of Berlin, Berlin 10587, Germany)

Abstract: The combustion cyclic variations of DMC/diesel burned in a common-rail engine under different conditions are studied, and the influences of COHR and EGR on combustion cyclic variations are also carried out. Results show that the combustion cyclic variations of different fuels burned in the common-rail engine are relatively small. The combustion cyclic variations of D10 are greater than that of diesel. The combustion cyclic variations at high load are relatively low. With the increase of COHR, the cyclic variations coefficient of p_{mi} are not obvious, while the characteristic parameter for p_{max} grows slightly and that for θ_d grows obviously. The rise of EGR rate could cause the slow increase of cyclic variation coefficients of D10 fuel, while that for diesel is relatively smooth. The high mean indicated effective pressure corresponds to short flame developing period.

Key words: Dimethyl carbonate High pressure common-rail diesel engine Combustion Cyclic variations